

Nachhaltige Praktika im Chemiestudium

Bahadir, Müfit

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 54, 2004, S.9-23



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Nachhaltige Praktika im Chemiestudium

M. BAHADIR

Ökologische Chemie und Abfallanalytik, Technische Universität Braunschweig
Lübenstraße 6, D-38124 Braunschweig

Einleitung

Die Chemie ist wie keine andere Disziplin ein experimentelles Fach, in dem die jungen Schüler und Studenten mit Hilfe von Experimenten an die Grundlagen geführt werden, wobei die Entwicklung von "handwerklichem" Geschick im Umgang mit chemischen Experimenten einen großen Raum einnimmt. Viele der heute in der Ausbildung an gymnasialen Kollegstufen und an Hochschulen exemplarisch eingesetzten Praktikumversuche sind jedoch historischen Ursprungs. Damals war die Wahrscheinlichkeit der Umweltkontamination noch weitgehend unbekannt und die Versuche auf solche Gefahren nicht untersucht. In jüngerer Zeit spielen Aspekte der Umwelt- und Arbeitssicherheit bei der Ausbildung eine überragende Rolle, worauf auch der Gesetzgeber durch den Erlass der Gefahrstoffverordnung sowie der TRGS 451 (Umgang mit Gefahrstoffen an Hochschulen) Einfluss nimmt.

Es gibt in der chemisch-präparativen Ausbildung eine Reihe von traditionellen Synthesen und Nachweisverfahren, die unter heutigen Gesichtspunkten im Hinblick auf gesundheitliche und Umweltgefahren wesentlich kritischer zu sehen sind als in der Vergangenheit. Solche Reaktionen spielen in der chemischen Technik eine außerordentlich wichtige Rolle und werden im industriellen Maßstab durchgeführt. Diese Reaktionstypen sind z.B. unter der Bezeichnung Chlorchemie in der Öffentlichkeit recht umstritten; sie sind aber ohne erhebliche wirtschaftliche Einbußen kaum zu ersetzen. Daher werden solche Reaktionstypen auch an Schulen und Hochschulen und der Laborantenausbildung in der Industrie als Ausbildungsversuche eingesetzt. Bei der Synthese von halogenierten Aromaten in chemischen Laboratorien zu Ausbildungszwecken besteht im Prinzip die Möglichkeit zur Bildung von Dioxinen und Furanen sowie ande-

* (Eingegangen 21.01.2004)

ren Schadstoffen mit hohem toxikologischen Potential. Dieser Aspekt wurde in der Vergangenheit jedoch praktisch kaum beachtet, da die umgesetzten Stoffmengen im Vergleich zu technisch bedeutsamen Synthesen um Größenordnungen kleiner sind.

Es stellt sich jedoch ungeachtet dessen die Frage, bei welchen Synthesen im Laborexperiment die genannten Schadstoffe entstehen und wie dieses Problem unter Gewährleistung der Arbeitssicherheit für die Auszubildenden in unterschiedlichen Ausbildungsstufen (Schüler, Laboranten, Studenten im Grundstudium der Chemie sowie Nebenfachstudenten in chemischen Praktika) gelöst werden kann. Darüber hinaus sind Aspekte der Nachhaltigkeit in dieser Stufe bisher kein Gegenstand der Ausbildung, da die Einsatzmengen der Edukte, Lösungs- und Betriebsmittel sowie die Entsorgung der Neben- und Abfallprodukte ein nur unbedeutendes Mengengerüst darstellen. Jedoch wären diese Gesichtspunkte in der Ausbildung zur Bewusstseinsentwicklung der angehenden Laboranten, Chemiker und Experimentatoren von erheblichem Interesse.

Der Anlass zu detaillierten Untersuchungen, über die hier berichtet wird, war der Nachweis von halogenierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PXDD/F mit X = Cl, Br) bei der häufig angewendeten Beilstein-Probe.

Schadstoffbildung in Chemischen Praktika

1872 stellte F. Beilstein seinen Schnelltest auf Halogene in organischen Verbindungen vor [1]. Danach werden beim Verbrennen einer Substanz auf einem Kupferdraht flüchtige Kupferhalogenide (Cl, Br) gebildet, die die Bunsenbrennerflamme grün färben. Trotz bestehender Zweifel an der Spezifität [2] wird die Beilstein-Probe als schneller Screening-Test vor allem auf Chlorid von Generationen von Chemie-Studenten sowie später im beruflichen Umfeld häufig angewendet. Betrachtet man die Reaktionsbedingungen bei der Durchführung der Beilstein-Probe, so sind sie zur Bildung der hochtoxischen Stoffklasse PXDD/F in besonderer Weise prädestiniert: Halogenorganische Verbindungen, Kupfer als Katalysator, hohe Temperaturen und oxidierendes Milieu [3].

Daher haben wir in Verbindung mit dem Institut für Organische Chemie der TU Braunschweig (Prof. Hopf) mit einer Reihe von Substanzenklassen die Beilstein-Probe durchgeführt, dabei die Verbrennungsgase vollständig aufgefangen und auf PXDD/F untersucht. In Abb. 1 ist die Laborapparatur zur Durchführung der Beilstein-Probe und quantitativen Probenahme dargestellt.

Zur Durchführung einer Beilstein-Probe benötigt man typischerweise ca. 5-10 mg Substanz zur Benetzung des Kupferdrahts. Um genügend Verbrennungsprodukte für die Dioxinanalytik zu erhalten, wurden je 100 mg Testsubstanzen in mehreren Portionen als Dioxin-Precursor (2,4-Dichlorphenol DCP, 2,4,6-

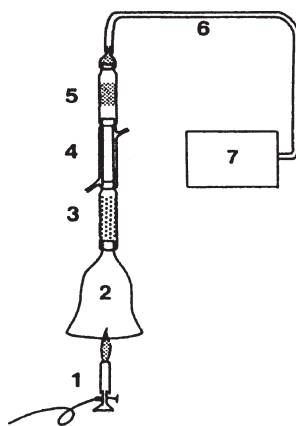


Abb. 1: Laborapparatur zur Durchführung der Beilstein-Probe; Bunsenbrenner (1), Glastrichter (2), Rohr mit Glaswolle (3), Kühler (4), PU-Schaum (5), Schlauch (6), Pumpe (7).

Trichlorphenol TCP, Pentachlorphenol PCP) bzw. Non-Precursor (Chlorbenzol MCB, Triphenylmethylchlorid TRITYL, Trichlorethylen TRI, Polyvinylchlorid PVC) in dieser Apparatur verbrannt, die auf Rußpartikel adsorbierten PCDD/F in der Glaswolle (3) und die freien gasförmigen PCDD/F im PU-Schaum (5) aufgefangen, beide Fraktionen nach Extraktion und clean up mit Hilfe der GC/MS in SIM Modus analysiert.

Die Beilstein-Probe führte bei allen untersuchten Substanzen zur Bildung von PCDD/F in unterschiedlicher Höhe. PCDD/F ist eine isomerenreiche Substanzklasse (75 Dioxine und 135 Furane), wobei die einzelnen Kongenere (jedes individuelle Isomer in der homologen Reihe) unterschiedliche Toxizitäten aufweisen. Nach quantitativer Bestimmung der einzelnen Kongenere werden die ermittelten Konzentrationen mit so genannten Toxizitäts-Equivalent-Faktoren (TEF) multipliziert, um die Gesamtwirkung des analysierten Gemisches abzuschätzen (Toxizitäts-Equivalent TEQ). Diese, auf das Kongener mit der höchsten Toxizität 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin bezogene, Gesamtoxizität wurde für die untersuchten Verbindungen ermittelt und ergab das folgende Bild: [4,5]

Precursor-Substanzen

DCP	555 pg TEQ / 5 mg
TCP	4.575 pg TEQ / 5 mg
PCP	4.260 pg TEQ / 5 mg

Non-Precursor-Substanzen

MCB	18 pg TEQ / 5 mg
TRITYL	26 pg TEQ / 5 mg
TRI	41 pg TEQ / 5 mg
PVC	37 pg TEQ / 5 mg

Sind nun diese Substanzmengen je Beilstein-Probe toxikologisch wirklich von Relevanz? Für diese Abschätzung können wir die ADI/TDI-Werte (acceptable daily intake bzw. tolerable daily intake bei gentoxischen Substanzen) für PXDD/F heranziehen. Diese leiten sich von tierexperimentellen Untersuchungen ab, wobei die LD_{50} für Ratte p.o. 22/45 $\mu\text{g/kg KG}$ (männlich/weiblich bezogen auf das Körpergewicht) und NOEL 1 ng/kg KG betragen. Multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor zur Übertragung dieser Werte auf den Menschen erhalten wir einen ADI/TDI-Wert von 1 pg/kg KG . Bei einem durchschnittlichen Körpergewicht von 70 kg übersteigen die ermittelten PCDD/F je Beilstein-Probe mit Precursor-Substanzen den ADI/TDI-Wert von 70 pg/d in allen Fällen erheblich.

Allerdings gelten diese Betrachtungen nicht für kanzerogene Substanzen. Die PCDD/F binden an den Ah-Rezeptor (aryl hydrocarbon), induzieren eine ganze Enzymkette, an deren Ende das Weichteil-Karzinom steht. In diesen Fällen ermittelt man das spezifische Krebsrisiko (RSD = risk specific dose), das von US EPA für PCDD/F mit 0,01 pg/kg KG für ein Krebsrisiko von $1:10^6$ abgeschätzt wurde. Von dieser Konzentration werden jedoch bereits 95% durch unsere Lebensmittel aufgenommen, und für sonstige Quellen verbleiben nur noch 5%. Wieder bezogen auf einen 70 kg Studenten bedeutet dies einen RSD-Wert von 0,035 pg , der mit jedem der untersuchten Substanzen um Größenordnungen überschritten wurde.

Am Ende unserer bundesweit, aber auch darüber hinaus viel beachteten Veröffentlichung in der Zeitschrift „*Angewandten Chemie*“ (und ihrer „*International Edition*“) empfohlen wir, auf die Beilstein-Probe in der täglichen Laborroutine gänzlich zu verzichten oder, falls dies nicht möglich sein sollte, nur unter einem Abzug durchzuführen, der mit einem Aktivkohlefilter und UV-Lampe zu Dekontaminationszwecken ausgestattet ist [4,5].

Diese frühen Arbeiten leiteten eine fruchtbare Kooperation der Institute für Organische Chemie und für Ökologische Chemie der TU Braunschweig ein, die noch heute intensiv fortgesetzt wird. In den folgenden Jahren wurden Praktikumsversuche aus dem Umfeld der „Halogenchemie“ mit einem wahrscheinlichen Bildungspotential für PXDD/F und anderen POPs (persistent organic pollutants) systematisch untersucht. Hierfür wurden Versuche aus einschlägigen Lehrbüchern Organikum, Gattermann-Wieland, Eicher-Tietze u.a. ausgewählt. Dazu zählten

- Bromierungsreaktionen an aromatischen Systemen [6],
- Synthesen von Chlorchinonen [7],
- Radikalische Chlorierung von Cycloaliphaten [8], und
- Umwandlungsreaktionen an halogenierten Aromaten [9].

Kurz zusammengefasst, wurden bei diesen Versuchen folgende Ergebnisse erhalten:

4-Bromphenol und *2,4-Dibromphenol* wurden durch Umsetzung von Phenol mit äquivalenten Mengen an Brom bei 0 °C hergestellt. Selbst diese milden Bedingungen führten zur Bildung von PBDD/F, welche in hohen Konzentrationen in den Destillationsrückständen angereichert bzw. durch längere Einwirkung von hohen Temperaturen in einer Kondensationsreaktion erst dort gebildet werden. Die Destillationsrückstände stellen somit hoch problematische Laborabfälle dar.

Bromaniline durch Bromierung von Anilin unter milden Bedingungen erfolgt ebenso leicht wie die Bildung von Bromphenolen. Wegen des Fehlens der phenolischen OH-Gruppe sind sie aber keine unmittelbaren Dioxin-Precursor. Jedoch unter oxidierenden Bedingungen können sie in Sekundärreaktionen ebenfalls hohe Konzentrationen an PBDD/F bilden, wie wir dies bei der destillativen Aufreinigung in den Rückständen nachweisen konnten.

Chloranile sind wichtige Zwischenprodukte in der industriellen Chemie. Sie sind aber auch bekannte PCDD/F-Quellen. Als Praktikumversuch wurde o-Chloranil durch oxidative Chlorierung von Brenzkatechin hergestellt. Hierbei wurden PCDD/F in signifikanten Konzentrationen nachgewiesen, auch wenn diese geringer waren, als in einer Probe von p-Chloranil in technischer Qualität, hergestellt aus Produktionsabfällen von Lindan.

Die *radikalische Chlorierung* von *Cycloaliphaten* untersuchten wir am Beispiel von Cyclohexan, um zu sehen, ob diese unter Praktikumbedingungen bis zum Hexachlorcyclohexan (verschiedene HCH-Isomere, insbesondere Lindan: γ -HCH) durchlaufen können. Wir stellten jedoch fest, dass die Chlorierung im wesentlichen Mono- und nur zum geringen Teil Dichlorcyclohexan liefert. Höher chlorierte Homologe wurden nicht nachgewiesen.

Interessant ist die Herstellung von *Chlorphenolen* aus Chloranilinen durch Verkochen der Diazoniumverbindungen. Dieser Reaktionsweg ist durch zahlreiche Nebenreaktionen gekennzeichnet, einschließlich Bildung von farbigen Kupplungsprodukten (Farbstoffe). Die Bildung von toxikologisch relevanten Schadstoffen, hier insbesondere von Polychlorierten Biphenylen (PCB) ist dabei abhängig von der Wahl der bei der Diazotierung eingesetzten Mineralsäure HCl bzw. H_2SO_4 . Diese Synthese mit Bildung der Nebenprodukte ist in Abb. 2 in Detail dargestellt. Wird mit HCl verkocht, entstehen *meta*- (4a) bzw. *para*-Dichlorbenzol (4b), die ihrerseits mit dem Phenylkation (2a bzw. 2b) zu den betreffenden PCB-Kongeneren reagieren.

Über diese Arbeiten wurde in praxisnahen Publikationsorganen zusammenfassend berichtet, um die gewonnenen Erkenntnisse der breiteren chemischen Öffentlichkeit bekannt zu machen [10].

Bei der Betrachtung der Schadstoffbildung in den erwünschten Hauptprodukten der Synthesen sowie insbesondere in den Neben- und Abfallprodukten der

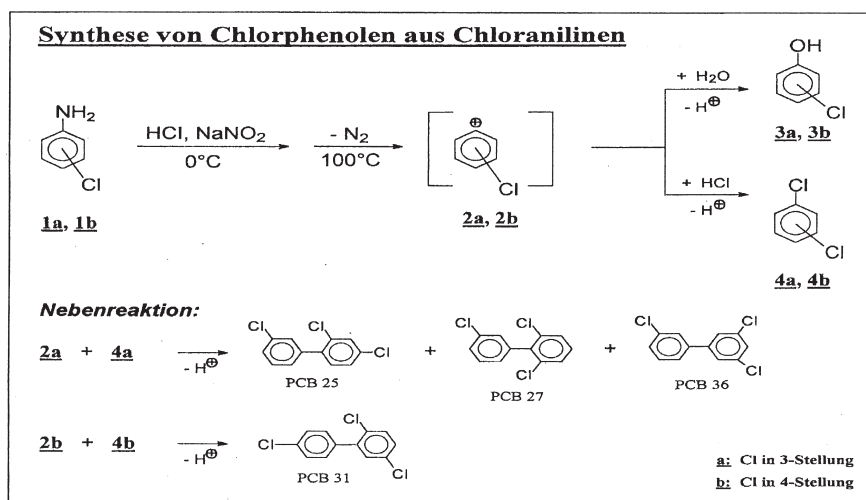


Abb. 2: Synthese von Chlorphenolen aus Chloranilinen und Bildung von PCB

Reaktionsgemische und Aufarbeitungsrückstände war deren gefahrlose Dekontamination bzw. Beseitigung ein weiterer Schwerpunkt in diesem Forschungsprojekt. Dabei wurden verschiedene Aspekte des photolytischen Abbaus der Dioxine und Furane in flüssigen Laborabfällen durch UV-Bestrahlung unter mechanistischen als auch Effizienzgesichtspunkten betrachtet [11-12] und festgestellt, dass bei Anwesenheit höherer Konzentrationen an Precursor im Abfall (z.B. Bromphenole) eine Neubildung von PBDD/F anstelle ihres Abbaus zu beobachten ist [13].

Bei Fragen der Nachhaltigkeit und der Umweltverträglichkeit in Chemischen Grundpraktika spielen neben den Aspekten der Schadstoffbildung selbstverständlich auch Aspekte der Arbeitssicherheit sowie der Luft- und Wasserreinhaltung im Praktikumbetrieb eine entscheidende Rolle. So spielten die Chemischen Institute der TU Braunschweig bei Einführung der Arbeitssicherheit und des Gefahrstoffrechts als Pflichtbestandteile in die Ausbildung aller Chemiestudenten bundesweit eine Vorreiterrolle [14]. Hierzu gehören neben der Kontrolle der Abwasserbelastung aus dem Praktikumbetrieb mit chlorierten Lösungsmitteln auch deren Ersatz bei einschlägigen Arbeiten [15], um deren Eintrittswahrscheinlichkeit in das Abwasser- und Abluftsystem zu minimieren und das Bewusstsein der Studierenden, wissenschaftlichen Mitarbeiter und (Gast-) Dozenten an Chemischen Instituten zu schärfen. Ein weiterer interessanter Bereich der Nachhaltigkeit, der auch im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) nachdrücklich gefordert wird, ist das Recycling von Lösungsmitteln, das

in unterschiedlicher Wertschöpfungstiefe wissenschaftlich untersucht, ökologisch und ökonomisch bewertet wurde [16,17].

Entwicklung eines nachhaltigen organischen Praktikums

Die oben dargestellten Arbeiten an der TU Braunschweig wurden zu einem Verbundprojekt durch Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück (DBU) weiterentwickelt, an dem 8 Arbeitskreise aus 6 Universitäten kooperieren und jeweils verschiedene Teilaspekte bei der Entwicklung eines nachhaltigen organischen Praktikums ausarbeiten.

Warum soll überhaupt ein neues organisch-chemisches Praktikum entwickelt werden? Die *klassischen Lerninhalte* dieser Praktika sind (a) Laboratoriumstechnik, (b) Theorie organischer Reaktionen, und (c) Nachweismethoden funktioneller Gruppen. Die *zusätzlichen Anforderungen* heute sind demgegenüber (d) Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen (Klassifizierung, Entsorgung, Recycling), (e) Effizienzbeurteilung chemischer Reaktionen (Stoffumsatz, Energie), und (f) Abschätzung von Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (hochtoxische Nebenprodukte, persistente Chemikalien) (Abb. 3).

Die Kriterien zur Beurteilung der durchzuführenden Reaktionen sind die folgenden:

- Möglichst große Bilanzausbeute
- Gute Chemo-, Regio- und Stereoselektivität, ggf. katalytische Prozesse

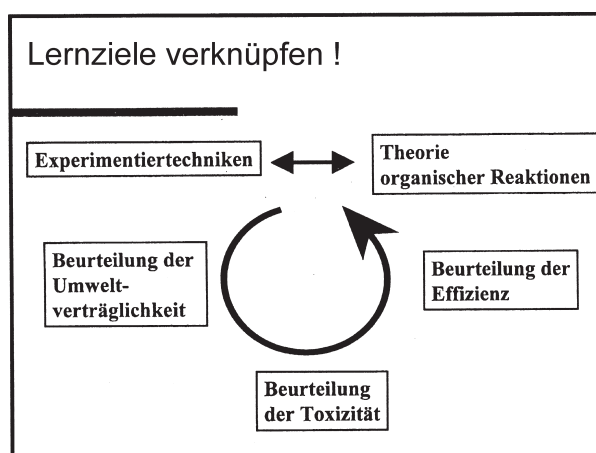


Abb. 3: Ziele und Methodik eines neuen organisch-chemischen Praktikums

- Minimierung des Energieaufwands
- Prinzip der materiellen und energetischen Ressourcenschonung (Verwendung nachwachsender Rohstoffe und katalytischer Prozesse)
- Effizienzsteigerung durch alternative Techniken (nicht-klassische Reaktionsbedingung)
- Berücksichtigung der Human- und Ökotoxizität verwendeter Chemikalien.
Mutagene und teratogene Verbindungen sollten bei Synthesen grundsätzlich nicht verwendet werden (inhärent sichere Synthesen und Prozesse)

Diesen liegen die 1998 von P.T. Anastas und J.C. Warner veröffentlichten *Twelve Principles of Green Chemistry* zugrunde [18]:

1. It is better to prevent waste than to treat or clean up after it is formed.
2. Synthetic methods should be designed to maximize the incorporation of all materials used in the process into the final product.
3. Wherever practicable, synthetic methodologies should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.
4. Chemical products should be designed to preserve efficacy of function while reducing toxicity.
5. The use of auxiliary substances (solvents, separation agents, etc.) should be made unnecessary whenever possible and, when used, innocuous.
6. Energy requirements should be recognized for their environmental and economic impacts and should be minimized. Synthetic methods should be conducted at ambient temperature and pressure.
7. A raw material or feedstock should be renewable rather than depleting whenever technically and economically practical.
8. Unnecessary derivatization should be avoided whenever possible (blocking group, protection/deprotection, temporary modification of physical/chemical processes).
9. Catalytic reagents (as selective as possible) are superior to stoichiometric reagents.
10. Chemical products should be designed so that at the end of their function they do not persist in the environment and instead break down into innocuous degradation products.
11. Analytical methodologies need to be further developed to allow for real-time in-process monitoring and control prior to the formation of hazardous substances.
12. Substances and the form of a substance used in a chemical process should be chosen so as to minimize the potential for chemical accidents, including releases, explosions, and fires.

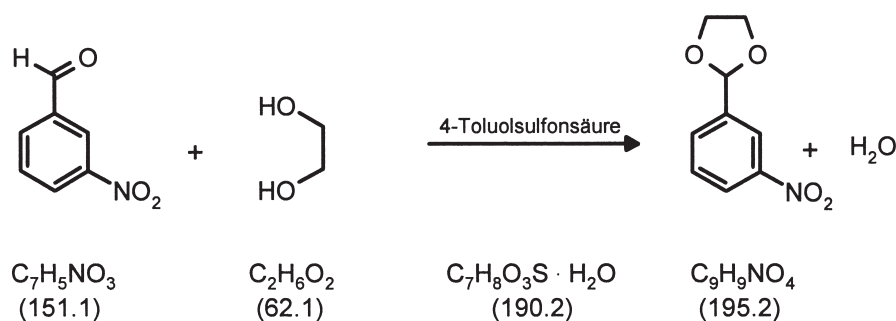


Abb. 4: Säurekatalysierten Acetalisierung von 3-Nitrobenzaldehyd mit Ethandiol zum 1,3-Dioxolan

Die *Optimierung der Arbeitsvorschriften* erfolgt in zwei Stufen:

Im 1. Schritt werden bekannte Arbeitsvorschriften nach den zuvor genannten Beurteilungskriterien evaluiert, und im 2. Schritt ausgewählte Arbeitsvorschriften optimiert, alle Reaktionsprodukte analysiert, spurenanalytisch nach toxischen Nebenprodukten gesucht, alle Sicherheitsdaten zusammen gestellt, nach alternativer Reaktionsführung mit besserem Energieeintrag gesucht, und schließlich wird die Reaktion nach Effizienz und ihren toxikologischen Aspekten beurteilt.

Diese Vorgehensweise soll am folgenden Beispiel der säurekatalysierten Acetalisierung von 3-Nitrobenzaldehyd mit Ethandiol zum 1,3-Dioxolan dargestellt werden (Abb. 4).

Es handelt sich dabei um eine unproblematische Reaktion: Arbeitsvorschrift (Mikroansatz, Labormaßstab, großer Ansatz), Geräte, Schwierigkeitsgrad, Zeitbedarf, Unterbrechungsmöglichkeiten, Recycling und Abfallbehandlung werden angegeben, der Reaktionsverlauf wird mit einer zeitgemäßen Analytik verfolgt (kinetisch wie thermodynamisch). Bei einer GC-Analyse des Rohprodukts werden 9% des Edukts und 91% des Produkts vorgefunden. Verunreinigungen liegen im Spurenbereich (< 0,1%). Für die Spezifität werden vom Roh- und dem gereinigten Produkt ^1H -NMR-Spektren aufgenommen, wo man im ersteren bei 10.1 ppm ein kleines Resonanzsignal des Aldehyd-Protons erkennt.

Führt man diese Acetalisierung im Mikrowellenfeld anstelle in einem herkömmlichen Ölbad oder Heizpilz durch, so werden bereits nach 5 min Reaktionszeit eine Ausbeute von 85% Produkt erhalten. Die GC-Analyse weist noch einen Anteil von 15% unreaktiertem Edukt auf. Die Kinetik der Reaktion kann so mit Hilfe der GC-Analyse des Rohprodukts verfolgt und die Reaktion zum gewünschten Zeitpunkt abgebrochen werden. Das bedeutet, dass die Heizmetho-

Tab. 1: Energieverbrauch bei 0,1 mol Ansatz in Abhängigkeit von der Heizmethode [kJ]

	Mikrowelle	Ölbad	Heizpilz
Energie der Reaktion	277	1505	1069
Energie der Aufarbeitung	79	227	79
Gesamtenergie	356	1732	1148

de einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Dies wird aus einem Vergleich der benötigten Energien für die Reaktion und der Aufarbeitung der Produkte deutlich (Tab. 1). Der Energieverbrauch wird dabei im wesentlichen von folgenden Faktoren bestimmt: Reaktionstemperatur und -dauer, Lösungsmittelart und -menge, Kühlung, Heizquelle und Wärmedämmung der Gesamtapparatur.

Für die Beurteilung einer Reaktion gibt es verschiedene Möglichkeiten, für die die Systemgrenzen jeweils definiert werden müssen, wie dies in Abb. 5 gezeigt ist:

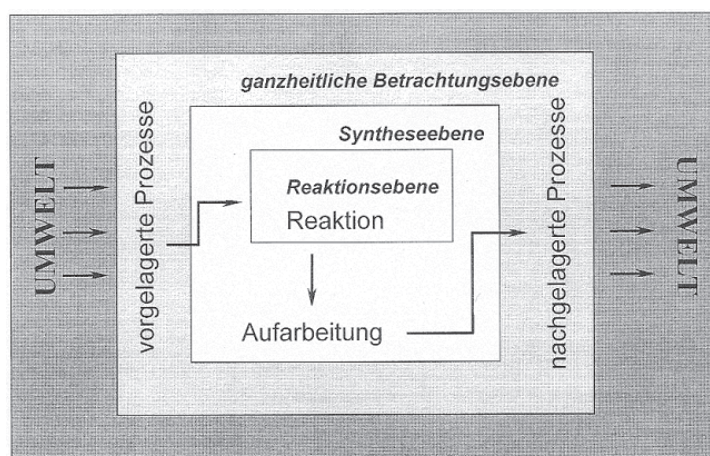


Abb. 5: Systemanalytische Beurteilung einer Reaktion auf unterschiedlichen Ebenen

Der Umgang mit Chemikalien birgt eine potentielle Gefahr für Mensch und Umwelt. Jeder, der in seinem Beruf mit Chemikalien umgeht, sollte daher in der Lage sein, auch gefährliche Substanzen sicher zu handhaben, Informationen zur Toxizität zu beschaffen und die möglichen Auswirkungen chemischer Pro-

zesse auf die Umwelt anhand dieser Daten abzuschätzen. Die Verwendung, das Verständnis und die Interpretation von toxikologischen Daten müssen daher ein wichtiger Teil der chemischen Ausbildung sein. Die folgende Reaktion, wieder ein typisches Beispiel aus Lehrbüchern und Praktikumsripten, macht dies anschaulich. Die Nitrierung von Toluol liefert mehrere Reaktionsprodukte in verschiedener Ausbeute. Die genaue Analyse der Rohproduktmischung zeigt, dass neben den erwarteten Reaktionsprodukten auch signifikante Mengen anderer Substanzen entstehen. Die Menge der Nebenprodukte ändert sich mit den Reaktionsbedingungen, ihre Bildung ist unter normalen Bedingungen aber nur schwer gänzlich zu vermeiden. Durch übliche Aufarbeitungsverfahren können die Produkte getrennt und gereinigt werden. Für die Bewertung der potentiellen Gefährdung durch die Reaktion müssen wir aber alle gebildeten Produkte, die gewünschten und die unerwünschten, mit einbeziehen. Alle Verbindungen sind entstanden und können in Kontakt mit Mensch und Umwelt gelangen (Abb. 6).

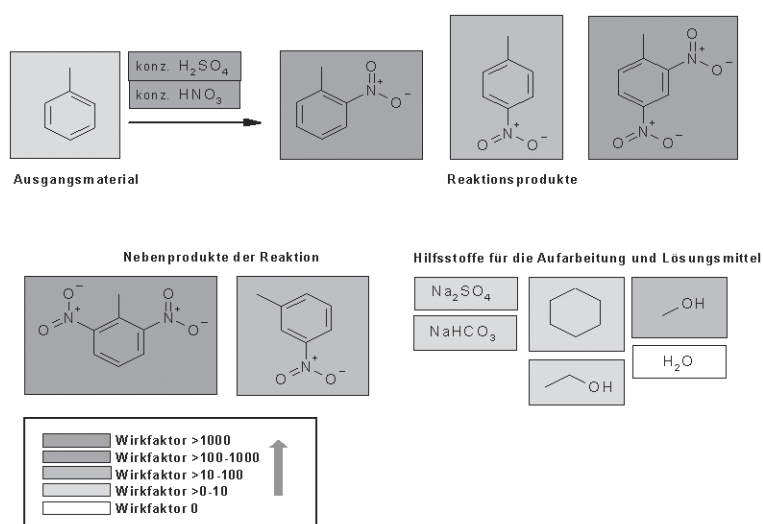


Abb. 6: Nitrierung von Toluol mit farbkodierten Wirkfaktoren aller beteiligten Substanzen [19]

Neue Formen der Präsentation der Ergebnisse

Zu Inhalten, Struktur und Umfang einer modernen Chemieausbildung an Universitäten, Fachhochschulen und Gewerbeschulen gibt es ebenso viele Ansichten, wie zur Frage, wie und in welchem Umfang diese am besten mit Aspekten der Nachhaltigkeit verknüpft werden. So wird jeder Ausbildungsstandort in

Deutschland, im Rahmen der Richtlinien und begutachtet durch die Akkreditierungsagenturen, den für ihn geeigneten Weg mit individuellen Schwerpunkten gehen. Um eine breite Nutzung der Projektergebnisse an diesen Ausbildungsstätten zu erreichen, werden die erarbeiteten Lehrmodule und -materialien als offenes Angebot präsentiert, aus dem Dozenten die jeweils geeigneten Teile auswählen oder für sich adaptieren. Der Bereich der organisch-chemischen Grundausbildung wurde als Rahmen für das Projekt ausgewählt, da er neben dem Chemiestudium auch fester Bestandteil der Curricula in Biologie, Biotechnologie, Medizin und einiger Ingenieurfächer ist. Es entsteht kein Lehrbuch einiger weniger Autoren, sondern ein Team, verteilt auf sechs Universitätsstandorte, erarbeitet gemeinsam die Inhalte. Die Teilnehmer bringen Expertise aus unterschiedlichen Gebieten mit, so dass auch Aspekte, die über die klassischen organischen Lehrinhalte hinausgehen, wie Ökobilanzierung, Energieverbrauch oder (öko-)toxikologische Bewertung fachkompetent bearbeitet werden. Als Endprodukt des Projekts entsteht eine interaktive Datensammlung, die im Internet frei verfügbar ist. Im Gegensatz zur „geschlossenen“ Form eines Lehr- oder Praktikumbuches, die sich nur durch Neuauflagen geringfügig ändert, liegt hier eine „offene“ Form vor, die auch durch andere Personen, als die ursprünglichen Bearbeiter, um gute Beiträge ergänzt werden kann. Und natürlich werden alle Materialien für Studierende und Dozenten kostenlos verfügbar gemacht.

Im *Endprodukt* sind z.Zt. 75 Laborexperimente zu finden, jeweils mit:

- detaillierter Vorschrift für drei Ansatzgrößen
- allen Sicherheitsdaten (R/S-Sätze) mit Diskussion
- Analytik der Roh- und Reinprodukte (GC, HPLC, NMR, IR)
- Angaben zu Bedeutung und Reaktionsmechanismus, Schwierigkeit, Zeitbedarf, Arbeitsmethoden, Geräten, Recycling, Abfallbehandlung
- Ausführliche Beurteilung der Reaktion unter Aspekten Effizienz und (öko-)toxikologischen Eigenschaften aller Substanzen
- wenn geeignet: Alternative effizientere Reaktionsführung
- bei Bedarf: Spurenanalytik der hochtoxischen Nebenprodukte

Für seine individuelle Lehrveranstaltungen wählt der interessierte Dozent geeignete Unterlagen aus. Es erfolgt keine Themen-, Umfangs- oder Strukturvorgabe für einen Kurs. Die Konzeption liegt allein im Ermessen des verantwortlichen Dozenten und so können die Schwerpunkte ganz unterschiedlich ausfallen: Klassische Organische Synthesemethoden und moderne Analytik im Praktikum, die um einige Seminarvorträge der Teilnehmer zur Effizienzbeurteilung organischer Reaktionen und Ökotoxikologie ergänzt werden. Apparative Analytik, die zur Reaktionsoptimierung und damit zur Effizienzsteigerung genutzt

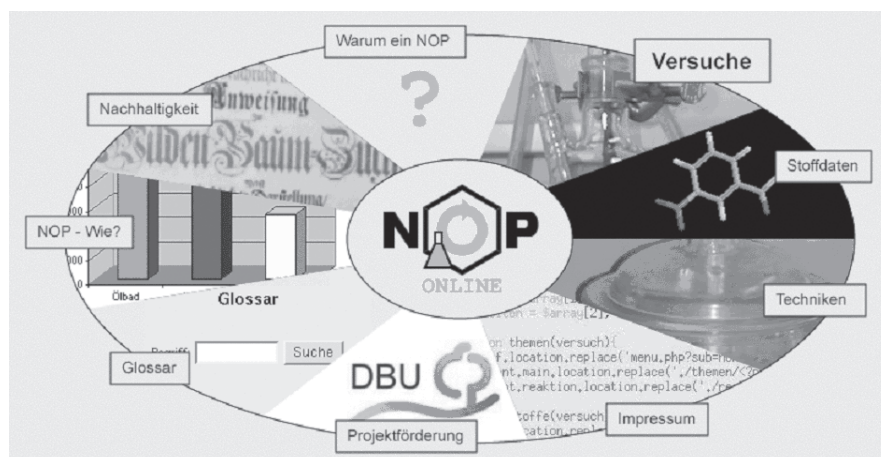


Abb. 7: Internetauftritt des Verbundprojektes (www.oc-praktikum.de)

wird, kann im Rahmen eines Kurses zur Chromatographie gelehrt werden. Die toxikologischen Daten wiederum können als anschauliche Beispiele, die Studierende z.T. aus dem eigenen Praktikum kennen, in der Vorlesung zum Erwerb des Gefahrstoffscheins genutzt werden. Klassische Lehrinhalte, wie Experimentiervorschriften, werden direkt verknüpft (nicht vermischt) mit Informationen, Texten und Daten zur Nachhaltigkeit, zum Umweltschutz und (Öko-)Toxikologie angeboten. So sollen diese Lehrinhalte zusammen mit dem klassischen „Programm“ vermittelt werden. Und passt das Thema Nachhaltigkeit absolut nicht in den Stundenplan, so hat der interessierte Studierende immer noch die Möglichkeit selbst im Internet nachzuschauen (Abb. 7).

Danksagung

Dieses Verbundprojekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, unter dem Aktenzeichen AZ 08457 gefördert, wofür ihr dieser Stelle ein herzlicher Dank gebührt.

Literatur

- [1] BEILSTEIN, F.: *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **5**, 620-621 (1872)
- [2] KELLER, A.: *Nature* **167**, 907-908 (1951)
- [3] HUTZINGER, O. & H. FIEDLER, *VDI-Berichte Dioxin* **634**, 17-35 (1987)

- [4] SCHOLZ-BÖTTCHER B.M., M. BAHADIR & H. HOPF: *Angew. Chem. Int. Ed.* **31**, 443-444 (1992)
- [5] SCHOLZ-BÖTTCHER, B.M, M. BAHADIR & H. HOPF: *Fresenius Envir. Bull.* **1**, 221-225 (1992)
- [6] VOGT, R., W. LORENZ, M. BAHADIR & H. HOPF: *LaborPraxis* **18**, 30-36 (1994)
- [7] VOGT,R., W. LORENZ, M. BAHADIR, H. HOPF & W. SCHMIDT: *Fresenius Envir. Bull.* **3**, 673-678 (1994)
- [8] VOGT, R., M. BAHADIR & H. HOPF (*unveröffentlicht*)
- [9] VOGT, R., W. LORENZ, M. BAHADIR & H. HOPF: *Fresenius Envir. Bull.* **3**, 746-750 (1994)
- [10] VOGT,R., W. LORENZ, M. BAHADIR & H. HOPF: *CLB Chemie im Labor und Biotechnik* **47**, 362-365 (1996)
- [11] RITTERBUSCH, J., W. LORENZ & M. BAHADIR: *Dioxin '93* **11**, 163-166 (1993)
- [12] RITTERBUSCH, J., W. LORENZ & M. BAHADIR: *Chemosphere* **29**, 1829-1838 (1994)
- [13] RITTERBUSCH, J., R. VOGT, W. LORENZ, M. BAHADIR & H. HOPF: *Chemosphere* **29**, 457-464 (1994)
- [14] BAHADIR,M.: *Nachr. Chem. Tech. Lab.* **39**, 1008 (1991)
- [15] KOINECKE, A., R. KREUZIG, M. BAHADIR, J. SIEBERS & H.G. NOLTING: *Fresenius J. Anal. Chem.* **349**, 301-305 (1994)
- [16] BITTNER, M., W. LORENZ & M. BAHADIR: *Fresenius Envir. Bull.* **2**, 635-658 (1993)
- [17] BITTNER, M., W. LORENZ & M. BAHADIR, *Fresenius Envir. Bull.* **3**, 633-638 (1994)
- [18] ANASTAS, P.T. & J.C. WARNER: *Green Chemistry Theory and Practice*, Oxford University Press, N.Y. (1998)
- [19] JASTORFF, B., R. STÖRMANN, U. WÖLCKE: *Struktur-Wirkungs-Denken in der Chemie*, Universitätsverlag Bremen, Oldenburg (2003)

Teilnehmer im Verbundprojekt*Optimierung der experimentellen Vorschriften:*

Prof. Lenoir/Prof. Parlar, Technische Universität München

Prof. Metzger, Universität Oldenburg

Prof. Hopf, Technische Universität Braunschweig

Prof. König, Universität Regensburg

Analytik toxischer Nebenprodukte / Bereitstellung von Sicherheitsdaten:

Prof. Bahadir, Technische Universität Braunschweig

Beurteilung von Reaktionen:

Prof. Jastorff, Universität Bremen

Prof. Kreisel, Universität Jena

Alternative Reaktionsführung:

Prof. Ondruschka, Universität Jena

Erstellung der elektronischen Datensammlung und Internetauftritt:

Prof. Jastorff, Universität Bremen

Projektkoordination:

Prof. König, Universität Regensburg